

西太平洋暖池海温的时空变化及其在 ENSO 循环中的作用*

王宏娜^{1,2,3} 陈锦年^{1,2,4} 吕心艳^{1,2,3}

(1.中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071;
3.中国科学院研究生院 北京 100049; 4. 中国气象局广州热带海洋气象研究所 广州 510080)

摘要 应用 SODA_1.4.2 版本资料, 分析研究了热带西太平洋暖池(以下简称 WPWP)海温场的变化特征, 讨论了 WPWP 海温的时空变化特征与 ENSO 之间的联系途径。分析结果表明, 在上层海洋, WPWP 的海温场在垂向结构上具有显著的年际变化特征, 在不同深度存在较大差异。表层的异常海温出现明显的增温趋势, 在 47 年期间(1958—2004)增温幅度达 0.15°C 。而随着深度的增加, 异常海温出现明显的降低趋势, 次表层(120—170 m)的降温幅度最大, 其降温可达 -0.72°C 。这种变化可能与 20 世纪 70 年代末 WPWP 区域的海温场发生突变过程存在一定关系。另外, 在热带太平洋温跃层曲面上, WPWP 区域海温变化与赤道东太平洋海温变化存在“跷跷板”现象。据此, 定义了赤道东西太平洋温跃层曲面上异常海温变化强度指数, 为 ENSO 循环过程的研究提供了又一参考依据。通过对 WPWP 不同深度的异常海温和海流分析发现, WPWP 异常海温的东传过程与赤道潜流的强弱变化存在密切关系。

关键词 WPWP ENSO 循环 EPOI 赤道潜流

中图分类号 P731.21

自 20 世纪 80 年代以来, 由于 ENSO 循环过程对全球气候变化产生了巨大影响, 人们对 ENSO 循环过程给予了极大关注。随着热带太平洋大尺度海气相互作用研究的不断深入, 人们注意到在 ENSO 循环过程中的暖(El Niño)冷(La Niña)事件的发生、发展与西太平洋暖池有着密切联系。自此, 西太平洋暖池成为又一研究热点。例如中美海洋和气象学家们联合开展了为期 6 年(1985—1990)的“热带西太平洋海气相互作用研究”就是很好的例证。

热带西太平洋和东印度洋常年维持着 $28\text{—}30^{\circ}\text{C}$ 的高温, 比赤道东太平洋的水温高出 $3\text{—}9^{\circ}\text{C}$ 。因此, 该区的水温异常变化将制约着亚太区域乃至全球的气候变化(Kurihara *et al*, 1986; Kurihara, 1989; 黄荣辉等, 1994), 尤其是会导致重大自然灾害的形成(黄

荣辉等, 2002)。所以, 西太平洋暖池区域海温异常对气候的影响是不可忽视的重要因素。

自 20 世纪 70 年代以来, 国内外学者对于 ENSO 形成的机理进行了深入的研究, 并取得了较大进展, 先后提出了多种理论和学说, 其中得到公认的有信风张弛理论(Wyrtki, 1975)、不稳定海洋波动理论(Philander *et al*, 1984)、延迟振子理论(Suarez *et al*, 1988; Neelin, 1991), 近年来提出的信号通道概念(陈锦年等, 2002, 2003)也得到了许多学者的认可。这些理论的提出使人们对 ENSO 循环机制的认识不断加深。特别是在近年来的研究表明, WPWP 次表层异常冷(暖)海温的变化及其沿赤道东传是导致 ENSO 循环的重要机制(李崇银等, 1999), 因此, 西太平洋暖池的变化将是维系 ENSO 循环的重要纽带。本文中作者

* 国家自然科学基金项目, 40676017 号和中国科学院知识创新工程项目, KZCX2-YW-214 号和 KZCX2-YW-Q11-02 号资助。
王宏娜, 博士研究生, E-mail: whn8142@163.com

通讯作者: 陈锦年, 研究员, E-mail: jnchen@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2007-12-15, 收修改稿日期: 2008-04-15

将利用分辨率较高的 SODA 资料, 全面分析西太平洋暖池海温的时空变化特征, 探讨其变化机理, 并进一步分析西太平洋暖池在 ENSO 循环中的作用, 为我国乃至全球气候变化的研究提供理论参考。

1 WPWP 不同深度异常海温变化

为了了解 WPWP 海温场在不同深度上的变化特征, 作者给出了 WPWP(130°E—180°, 10°S—10°N) 不同深度上海温距平的变化曲线。由图 1 可以发现, WPWP 区域海温场具有明显的年际变化特征。在不同深度的海温变化过程中, 表层的异常海温变化振幅最小(−0.7°C 和 0.5°C 之间), 随着深度的增加, 异常海温变化振幅增大, 120—170m 处达到最大(−5.0°C 和 3.7°C 之间)。随着深度的继续加深, 异常海温变化振幅又开始减小。另外, 还可以看出, 在 WPWP 的 SST

和 465m 处具有明显的增温趋势, 而次表层(120—170m)海温则显示出明显的降温趋势。由倾向方程可知, 在 1958—2004 年共 47 年中, WPWP 区域的 SST 升高了 0.15°C, 随着深度的加深, 海温升高趋势逐渐减小, 在 57 m 深度上的海温只升高了大约 0.05°C。随着深度的继续增加, 海温开始降低, 在深度为 148 m 处的海温降温达到最大, 其降温幅度可达 −0.72°C。但在 465 m 处的海温场又出现了增温现象, 其增温幅度达 0.14°C, 增温幅度与表层海温相当。这可能是由于全球气候变暖伴随的海温场也变暖引起的, 而次表层的降温可能是由于 80 年代以后 ENSO 事件的发生频率和强度都明显增加, 使得 WPWP 次表层向东传播的能量增多, 从而使其自身温度降低。然而造成这种现象的真正原因以及其中的机理问题还需要进一步的研究。

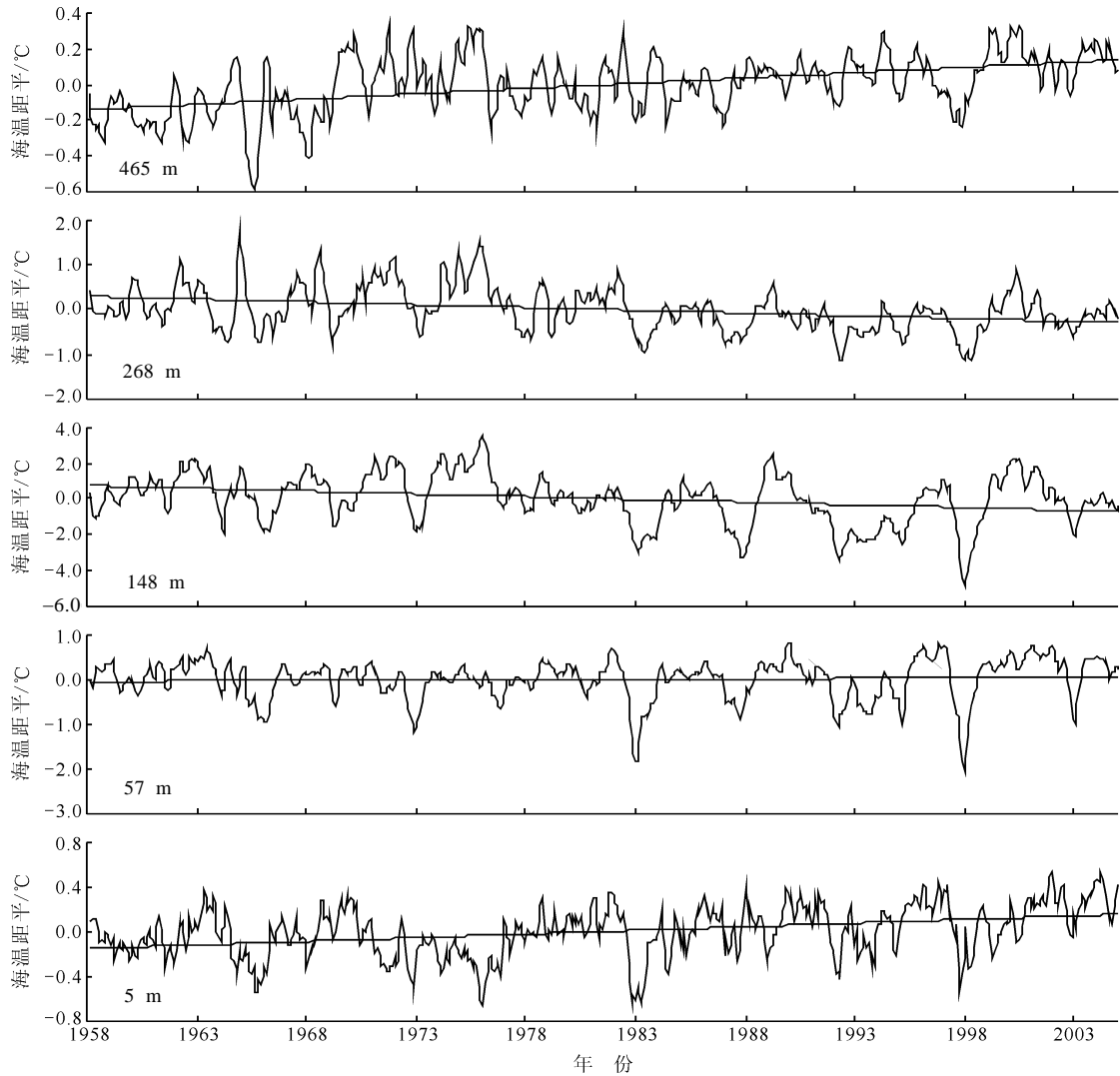


图 1 西太平洋暖池(WPWP)不同深度海温距平的变化特征

Fig.1 The variability in anomalous ocean temperature in different depths of the Western Pacific Warm Pool (WPWP)

研究表明, 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 经历了一次全球范围的气候突变(符淙斌, 1994)。那么在这种气候突变的背景下, 对 ENSO 循环过程有着重要贡献的 WPWP 区域的次表层海温场是否也会发生相应的突变现象? 为此, 作者取 WPWP 区域异常海温变化最为显著的温跃层(120—170m)附近的海温场, 应用 Mann-Kendall 法对其进行突变检验。结果表明, WPWP 区域的海温场在 20 世纪 70 年代末(1979 年)也出现了明显的突变过程(图 2), 这一突变过程与北太平洋海温和暖池面积的跃变过程相一致(于淑秋等, 1997; 赵永平等, 2002), 与气候突变过程发生的时间相吻合。

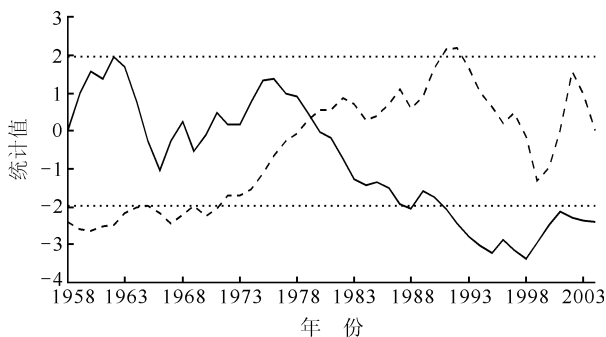


图 2 WPWP 区域次表层海温变化的 M-K 突变检验(虚线为 95% 置信水平临界值)

Fig.2 The M-K test of abrupt change in marine subsurface temperature in WPWP(The two dotted horizontal lines are borders of confidence level at 95%)

为了探讨 WPWP 区域垂向海温场在突变前后的变化特征, 作者对 WPWP 区域海温场突变前后的变化进行了对比分析。图 3 给出了 WPWP 不同深度的气候突变前(1958—1979)后(1980—2004)海温的变化

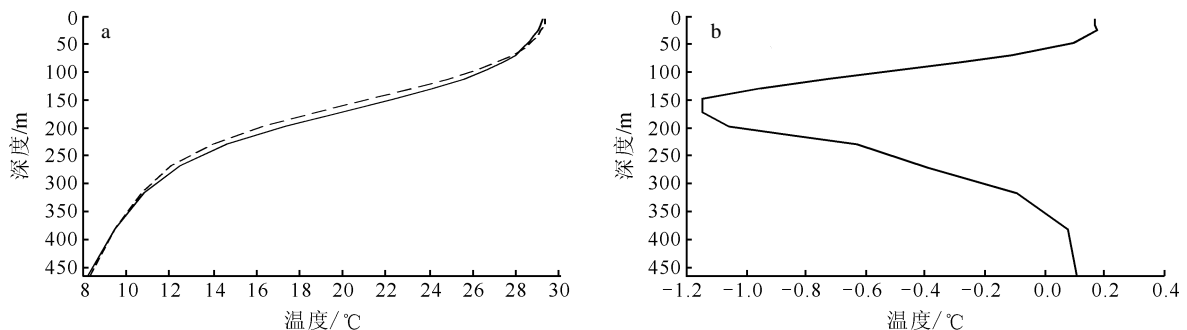


图 3 气候突变前(实线)后(虚线)WPWP 区域海温的垂直分布(a); 气候突变前后的温度差(b)

Fig.3 The vertical variation in ocean temperature in WPWP pre (solid line) and post (dashed line) climate shift (a); The difference of ocean temperature in WPWP between pre and post climate shift (b)

差异。由图 3 可以清楚地看出, 在表层至 465 m 的垂向深度上, 海温场出现明显的变化, 在气候突变后的表层海温出现增温趋势, 而在 70 m 以深, 海温出现明显的降温过程, 在 150—170 m 降温最为显著, 最大降温可达 -1.15°C 。在 300 m 以深, 异常海温又开始增温, 到 465 m 处的增温可达 0.1°C 以上。这一结果与 Sun 等(2006)提出的第二斜压模态结果相一致。WPWP 区域出现这种强烈的海温异常变化过程可能与气候突变存在密切关系, 其机制目前尚不完全清楚, 仍需要进一步深入研究。但这一现象恰好与 20 世纪 80 年代前后 ENSO 发生强度和频率变化相对应。

2 WPWP 区域海温场与 ENSO 循环

2.1 WPWP SST 和次表层海温变化与 ENSO 的关系

为了进一步探讨上述 WPWP 上层海温和次表层海温对 ENSO 的贡献, 作者对其分别进行小波分析(图略)。结果表明, WPWP 次表层海温(80—227m)与 NINO3 的海温变化周期基本一致, 所不同的是它们的变化呈反位相关系。从 WPWP 区域次表层海温的周期变化来看, 在 1958—1960 年代末, 存在 2—3 年和 10—13 年的周期, 但后者相对较弱。在 1970 年以后, 周期发生了明显变化, 以 3—7 年的周期为主, 同时也出现了相对明显的 10—13 年的年代际变化周期。特别指出的是, 在 1980 年以来, 其 3—7 年的周期明显加强, 10—13 年的周期也存在类似的变化特征, 但仍未通过 95% 信度检验。另外, 从年际和年代际变化来看, 它们存在锁相现象。这种现象发生在 1982/1983, 1986/1987, 1990—1995 和 1997/1998 El Niño 事件发生期间。NINO3 异常海温的周期变化与 WPWP 区域次表层海温周期具有相同的变化趋势。由小波分析可知, WPWP SST 的周期变化与 NINO3 和 WPWP

次表层海温的周期明显不同(图略)。在1960年中期以前,其周期主要发生在4—6年的频段上,其后4—6年周期变弱,出现了2—5年的周期。该周期维持到80年代中期,之后又恢复到4—6年的周期。

综上所述,WPWP次表层海温和NINO3的海温变化周期基本一致,而WPWP SST与次表层海温和NINO3的海温变化周期存在较大差异。

根据小波分析的结果,应用带通滤波技术提取了WPWP和赤道东太平洋(150°—90°W; 5°S—5°N)海温3—7年和10—13年年际和年代际两个频段上的信息,后者年代际变化未通过95%信度检验,本文中暂不作分析。由图4可以清楚地看出,WPWP区域次表层海温的3—7年周期的信号非常显著,自上世纪50年代以来,显著的冷(暖)海温主要发生在次表层(50—

250m),而最大冷(暖)海温恰好对应于ENSO循环过程中的(El Niño)(La Niña)事件。值得注意的是,随着时间的变化WPWP区域异常海温变化强度也出现了较为显著的变化,以WPWP海温突变前后的表现最为突出,突变后的变化强度明显较突变前加强。

对应图5可以看出,位于赤道东太平洋异常冷(暖)海温的最大变化发生在50—100 m之间,突变前的异常冷(暖)海温变化信号较弱,突变后的异常冷(暖)海温变化信号较强。这一变化过程与WPWP区域不同深度上的海温变化有着相同的变化趋势。所不同的是,它们之间存在反位相的变化特征。另外,赤道东太平洋异常海温变化的深度浅于WPWP区域。值得注意的是,位于WPWP区域和赤道东太平洋的最大异常海温信号变化的深度恰好出现在温跃层曲面上。

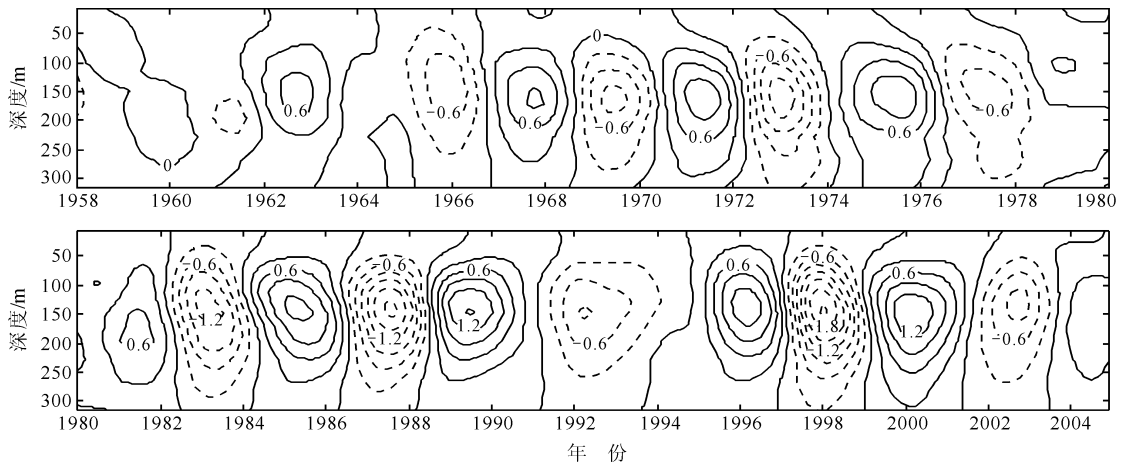


图4 WPWP区域异常海温深度-时间变化(3—7年带通滤波)

Fig.4 The depth-time profile showing variation in sea temperature anomaly (filter of 3—7a) in WPWP

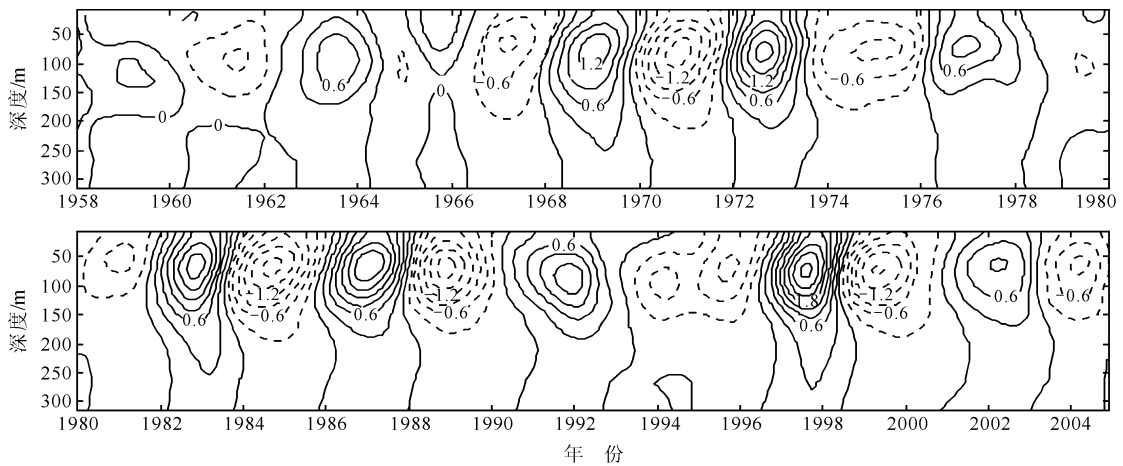


图5 赤道东太平洋异常海温深度-时间变化(3—7年带通滤波)

Fig.5 The depth-time profile showing variation in anomalous sea temperature (filter of 3—7a) in tropical eastern Pacific

2.2 赤道太平洋温跃层曲面上海温“跷跷板”特征

根据小波分析可知,在赤道太平洋温跃层曲面上的 WPWP 海温与赤道东太平洋区域海温变化的周期相吻合。为了探讨它们内在的联系,作者选取了可以表征 WPWP 次表层海温变化特征区域(150°—170°E,5°S—5°N)温跃层曲面上(选取 20°C 等温线深度所在层面为温跃层曲面)的海温平均值与热带太平洋温跃层曲面上的海温场进行相关分析,结果表明,WPWP 区域温跃层曲面上的海温平均值不仅与其周围的海温存在密切的正相关,而且与赤道东太平洋海温场存在明显的负相关。这一结果表明,在赤道太平洋温跃层曲面上也存在“跷跷板”现象(图 6)。当 WPWP 区域的次表层海温降低时,赤道东太平洋上层海温升高;当 WPWP 区域的次表层海温升高时,赤道东太平洋上层海温降低。这种“跷跷板”现象在 El Niño 或 La Niña 事件发生期间更加明显。

为了给出东西太平洋温跃层曲面上异常海温的

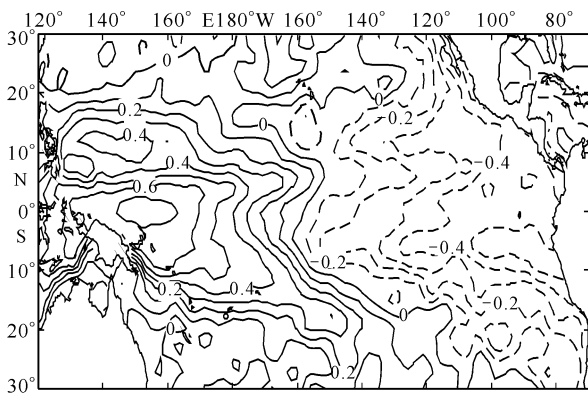


图 6 热带太平洋温跃层曲面上海温场“跷跷板”现象

Fig.6 The “seesaw” phenomenon of the sea temperature on the curved surface of thermocline in tropical Pacific

图中数字表示 WPWP(150°—170°E,5°S—5°N)异常海温与太平洋温跃层曲面上海温的相关系数

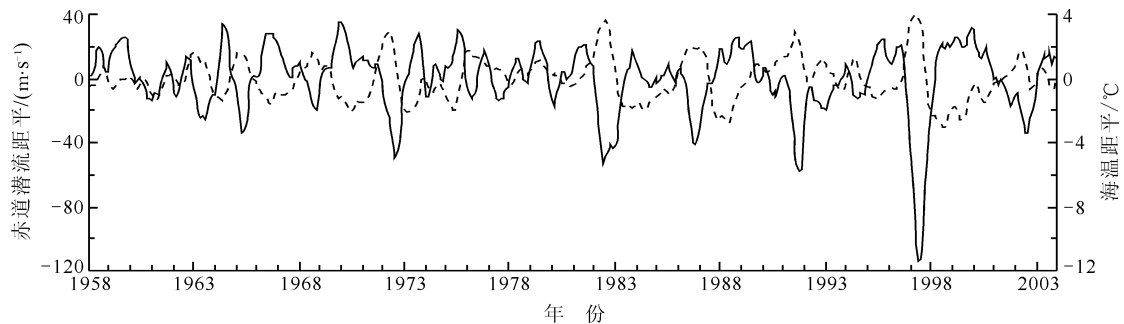


图 7 赤道潜流(实线, 150°—110°W, 50—100m)与赤道东太平洋温跃层曲面上海温(虚线)距平变化曲线(5 个月滑动平均)

Fig.7 The time-series variable curve of the undercurrent (solid line, 150°—110°W, 50—100m) vs. anomalous sea temperature on the curved surface of thermocline (dashed line) in equatorial eastern Pacific (running average of 5 months)

强度变化指数,作者选取了温跃层曲面上赤道东太平洋(120°—80°W, 5°S—5°N)海温平均值与 WPWP (150°—170°E, 5°S—5°N)海温平均值的差值,定义为赤道太平洋温跃层曲面上的异常海温强度指数(简称为 $EPOI$)。

$$EPOI = EEPT - WPWP$$

其中, $EEPT$ 表示(120°—80°W, 5°S—5°N)平均异常海温, $WPWP$ 表示(150°—170°E, 5°S—5°N)平均异常海温。

将新定义赤道太平洋异常海温强度指数与南方涛动指数(SOI)进行比较,结果发现,两者具有非常显著的负相关关系。由相关分析表明, $EPOI$ 与 SOI 的最佳相关出现在前者滞后 1 个月,相关系数 $r = 0.72$ 。也就是说,当 SOI 出现升高(降低)之后的 1 个月, $EPOI$ 将会出现降低(升高)。特别指出的是,用作者定义的 $EPOI$ 能够很好地反映出 ENSO 循环过程中出现的冷(暖)事件。

3 WPWP 海温场对 ENSO 过程的影响

上述分析研究表明,在温跃层曲面上的 WPWP 海温变化与 ENSO 循环过程存在密切关系,WPWP 次表层异常海温影响 ENSO 循环过程的主要途径是沿温跃层东传(李崇银等, 1999; 陈锦年等, 2002),而且普遍认为是以 Kelvin 波的形式向东传播所致(李崇银等, 2000; 巢纪平等, 2003)。作者曾对赤道太平洋异常海温东传与赤道潜流之间的关系进行初步分析(陈锦年等, 2005),认为赤道潜流变化对 WPWP 次表层异常海温东传有重要的作用。

为了进一步证明赤道潜流对 WPWP 次表层海温东传的作用,作者分析了赤道潜流和东太平洋海温的关系。图 7 是 1958—2004 年赤道潜流和赤道东太

平洋温跃层曲面上(150°—110°W)异常海温变化曲线。由图7可以看出,赤道潜流与赤道东太平洋温跃层曲面上海温变化具有显著的对应关系。由相关分析可知,它们的最佳相关出现在赤道潜流超前赤道东太平洋温跃层曲面上海温10个月和赤道潜流滞后4—5个月,前者最大相关系数 $r=0.50$,后者最大相关系数 $r=-0.67$ (样本个数 $n=564$),其相关系数远远超过99%的信度检验。这一结果不难解释,当赤道东太平洋温跃层曲面上的海温异常升高的前期20个月(1.5年),赤道潜流就出现增强的趋势,并达到99%的相关信度水平检验。随着时间的推移,两者相关程度逐渐增强,时滞10个月后,东太平洋赤道潜流流速最强。在这期间,赤道潜流的持续增强,通过平流作用引导西太平洋暖池区域的异常海温东传,最终导致赤道东太平洋温跃层曲面上的海温场异常增温。当由西太平洋东传的异常海温信号足够强时,即可引发El Niño事件。而赤道东太平洋异常正海温信号强度达到最强时之后,赤道潜流迅速减小甚至出现反向,特别是在El Niño事件爆发期间,这种现象更为明显,这一结果与TOGA/TAO实测结果相一致(陈锦年等,2005)。

4 结论

(1) WPWP区域不同深度的海温呈现出不同的变化特征,上层海温出现增暖趋势,而次表层异常海温则出现降温趋势。次表层海温异常变化振幅(-5.7°C和3.8°C之间)与NINO3指数变化振幅(-2.2°C和3.7°C之间)基本相同,而与表层海温异常变化振幅(-0.6°C和0.7°C之间)存在较大差异。从能量学角度可以说明,WPWP区域的表层异常海温对ENSO循环过程的影响不明显,而次表层异常海温东传是导致ENSO循环的重要原因。

(2) 小波分析结果表明,WPWP区域的次表层海温与赤道东太平洋温跃层曲面上的海温变化周期相一致,自1960年以来,它们的年际变化周期出现在3—7年和10—13年的两个主要频段上。而WPWP区域的表层海温变化周期与赤道东太平洋和WPWP区域次表层海温的变化周期有着明显差异。

(3) 赤道东、西太平洋温跃层曲面上的异常海温场存在“跷跷板”现象,利用赤道东西太平洋温跃层曲面上的海温差,定义的强度指数(EPOI)与南方涛动指数有很好的负相关关系,为ENSO循环过程的研究提供了一个新指标。

(4) 赤道潜流的增强和减弱对ENSO循环过程有

重要的贡献,它可能是联系WPWP区域次表层异常海温变化与ENSO循环过程的桥梁。

参 考 文 献

- 于淑秋,林学椿,1997.北太平洋海温的气候跃变及其对中国汛期降水的影响.热带气象学报,13:265—275
- 李崇银,穆明权,1999.厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋次表层海温异常.大气科学,23(5):513—521
- 李崇银,穆明权,2000.东亚冬季风-暖池状况-ENSO循环的关系.科学通报,45(7):678—685
- 陈锦年,何宜军,许兰英等,2002.赤道太平洋次表层海温异常的信号通道.见:台湾大学,中山大学,台湾海洋大学等编.2002年第5届海峡两岸台湾邻近海域海洋科学研讨会论文集.基隆:台湾海洋大学,211
- 陈锦年,宋贵霆,褚健婷等,2003.北赤道流区海温异常与ENSO循环.热带海洋学报,22(4):10—17
- 陈锦年,宋贵霆,褚健婷等,2003.赤道太平洋次表层海水温度异常的信号通道.水科学进展,14(2):152—157
- 陈锦年,吕心艳,胡敦欣,2005.赤道太平洋潜流变化特征及其与异常海温东传.水科学进展,16(6):792—798
- 赵永平,吴爱明,陈永利等,2002.西太平洋暖池的跃变及其气候效应.热带气象学报,18(4):317—326
- 符淙斌,1994.气候突变现象的研究.大气科学,18(3):373—384
- 黄荣辉,孙凤英,1994.热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响.大气科学,18(2):141—151
- 黄荣辉,孙凤英,1994.热带西太平洋暖池上空对流活动对东亚夏季季节内变化的影响.大气科学,18(4):456—465
- 黄荣辉,周连童,2002.关于我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究.灾害学报,11:1—9
- 巢纪平,袁绍宇,巢清尘等,2003.热带西太平洋暖池次表层暖水的起源——对1997/1998年ENSO事件的分析.大气科学,27(2):145—151
- Kurihara K, Kawahara M, 1986. Extremes of East Asian weather during the post ENSO years of 1983/84 severe cold winter and hot summer. J Meteor Soc Japan, 64: 494—503
- Kurihara K, 1989. A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western Northern Pacific. Geophys Mag, 43: 45—104
- Neelin J D, 1991. The slow sea surface temperature mode and the fast-wave limit: Analytic theory for tropical interannual oscillations and experiments in a hybrid coupled model. J Atmos Sci, 48: 584—606
- Philander S G H, Yamagata T, Pacanowski R C, 1984. Unstable air-sea interactions in the tropics. J Atmos Sci, 41: 604—613

- Suarez M J, Schopf P S, 1988. A delayed action oscillator for ENSO. *J Atmos Sci*, 45: 3283—3287
- Sun J L, Peter C, Liu Q Y, 2006. The Role of the Halted Baroclinic Mode at the Central Equatorial Pacific in El Niño Event. *Adv Atmos Sci*, 23: 45—53
- Wyrski K, 1975. El Niño—The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanog*, 5: 572—584

SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY IN OCEAN TEMPERATURE IN WEST PACIFIC WARM POOL AND ITS EFFECT IN ENSO CYCLE

WANG Hong-Na^{1,2,3}, CHEN Jin-Nian^{1,2,4}, LU Xin-Yan^{1,2,3}

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 3. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*; 4. *Institute of Tropical and Oceanic Meteorology China Meteorological Administration, Guangzhou, 510080*)

Abstract Based on the Simple Ocean Data Assimilation (SODA_1.4.2) dataset, the variability in ocean temperature in the West Pacific Warm Pool (WPWP) was analyzed. The spatial and temporal variation in ocean temperature in WPWP and its relationship with the ENSO cycle were discussed. The results indicate that the vertical inter-annual variability in ocean temperature in WPWP was notable, and the temperature varied greatly in different water depths. Surface temperature of the ocean increased abnormally by 0.15 °C in 47 years (1958—2004). However, the abnormal temperature reduced with the increase of depth. The maximal temperature decrease by -0.72 °C was found in the subsurface(120—170m). Perhaps this variability was somehow related with the abrupt change in marine temperature in the end of 1970s. In addition, on the thermocline curved surface in tropical Pacific, a “seesaw” phenomenon between the abnormal sea temperature in WPWP and in east equatorial Pacific has been observed. Therefore, an index to the equatorial Pacific sea temperature oscillation (EPOI) was defined to describe the phenomenon, and should help study the ENSO cycle. Analyses on the variability of anomalous ocean temperature and current in different depths in the equatorial Pacific have found that the eastward propagation of the anomalous sea temperature in WPWP was closely related with the variability of the equatorial undercurrent.

Key words WPWP, ENSO cycle, EPOI, Equatorial undercurrent